

Терентьев О.М., д.т.н., проф.  
Клещов А.Й., к.т.н.  
Сергієнко М.І., ст. викладач  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

## СТАТИКО–ДИНАМІЧНЕ РИХЛЕННЯ МЕРЗЛИХ ПОРІД

O.Terentiev, Dr. Eng. Sc., Prof.,  
A. Klechov, Cand. Eng Sc.,  
M. Sergienko, Assoc. Prof.  
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

## STATIC–DYNAMIC LOOSENING OF FROZEN ROCKS

Рихлення мерзлих порід та ґрунтів є одним із найбільш складних, трудомісних та економічно затратних технологічних процесів в гірничо–енергетичному та військовому комплексах, будівництві автошляхів та промислових об'єктів, прокладанні каналів, меліорації та інших галузях промисловості.

З усіх розрихлювачів, що мають механічні засоби руйнування мерзлих гірських порід та ґрунтів, переважні гідروпневматичні ударні інструменти. Вони руйнують мерзлі породи значними динамічними навантаженнями. Гідропневматичні ударні механізми характеризуються високою питомою енергією, автономністю подачі, компактністю, низькою металоємністю, простотою конструкції та управлінням в роботі. Також знаходять все більше визнання розрихлювачі з комбінованими способами розробки вибоїв.

У цій статті представлені результати практичних досліджень розпушування мерзлих гірських порід та ґрунтів. Встановлено залежності зміни швидкості антифазного розпушувача гідропневматичного молотка, енергії та частоти ударів.

Вибрані та обґрунтовані робочі параметри активного розрихлювача з антифазним робочим органом. Промисловими випробуваннями підтверджено, що оптимальним режимом активного рихлення породного масиву з числом ударів щільності ДорНДІ  $C=100...110$  є режим при середній швидкості руху базової машини  $0,88 \text{ м/с}$  і активізації зуба ударами енергією  $7,5 \text{ кДж}$  з частотою  $2,0 \text{ Гц}$ . Оптимальність цього режиму підтверджена мінімальною питомою енергоємністю  $1282 \text{ кДж/м}^3$ , при продуктивності  $0,175 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Натурні випробування активного розрихлювача проводилися в зимовий період на полігоні селища Гореничі Київської області. Промерзання ґрунту досягало  $1,1 \text{ м}$ . Вплив глибини рихлення на швидкість рихлення активного розрихлювача вивчався при тяглових зусиллях базової машини  $0,16$  і  $0,24 \text{ МН}$ . Активне рихлення ведеться при коефіцієнті зчеплення базової машини з поверхнею складали відповідно  $0,4$  і  $0,6$ . Зміна швидкості з ростом глибини рихлення носить нелінійний характер. Зі збільшенням глибини від  $0,4$  до  $0,5 \text{ м}$  швидкість рихлення знижується в  $1,83$ ;  $1,72$ ; і  $1,74$  рази при енергії удару відповідно  $6,0$ ;  $7,0$  і  $8,0 \text{ кДж}$ . При зростанні глибини рихлення від  $0,5$  до  $0,6 \text{ м}$  інтенсивність зниження швидкості зменшується. В цьому випадку швидкість знижується відповідно в  $1,52$ ;  $1,45$  і  $1,74$  рази. Збільшення глибини рихлення від  $0,6$  до  $0,7 \text{ м}$  веде до зниження швидкості рихлення відповідно у  $1,29$ ;  $1,23$  і  $1,56$  рази.

**Ключові слова:** мерзлий ґрунт, способи рихлення, активні розрихлювачі, продуктивність, питома енергоємність рихлення

## ВСТУП

З усіх розрихлювачів з механічним способом руйнування перевага належить розрихлювачам з гідропневмоударними виконавчими органами. Вони руйнують вибій значними динамічними навантаженнями. Гідропневмоударні механізми відрізняються великою питомою енергоозброєністю, автономністю живлення, компактністю, малою питомою металоємністю та конструктивною простотою. В теперішній час знаходять все більше визнання розрихлювачі з комбінованими способами навантаження вибоїв [1, 2].

Відмінністю прийнятої класифікації розрихлювачів від відомих, є синтез виконавчих органів, як одночасного так і послідовного руйнування вибою комбінованими навантаженнями різного виду. Такий синтез проведений вперше. Класифікація дозволила систематизувати пошук і вибір технічних рішень комбінованих виконавчих органів активного рихлення різних породних масивів [3, 4].

Синтез можливих варіантів комбінованих виконавчих органів для активного рихлення мерзлих та напівскельних ґрунтів проведено на основі теорії графів (рис. 1).

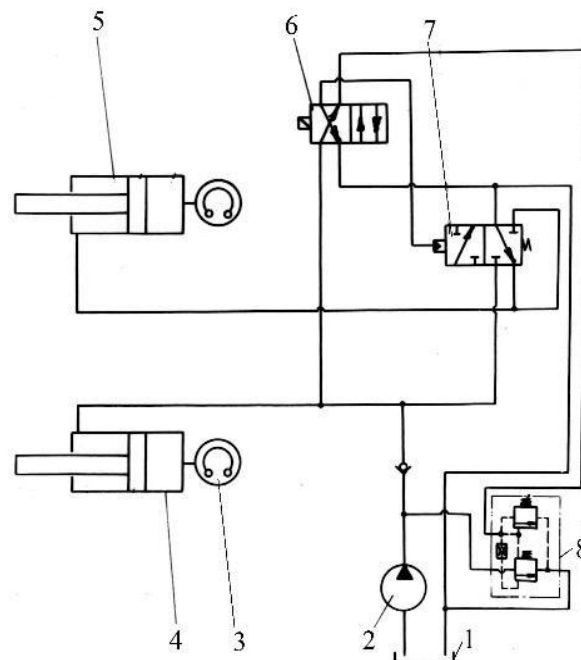


**Рисунок 1 – Синтез можливих варіантів комбінованих виконавчих органів для активного рихлення мерзлих та напівскельних ґрунтів**

Синтез комбінованих виконавчих органів розрихлювачів проведено за допомогою теорії графів. П'ятикутний орієнтований граф Понтрягіна – Куратовського дозволив отримати 10 варіантів комбінованого одночасно двох способів навантаження вибою [5, 6]. А за допомогою п'ятикутного орієнтованого графу з не строго паралельними дугами отримано 20 варіантів комбінованого послідовно руйнування окремими способами. Вага кожної дуги цього графу позначає одну комбінацію двох різних способів руйнування породного масиву. Комбінація визначена двома вершинами, що зв'язані між собою однією дугою. Перехід до літерних позначень надав можливість побудувати квадратичну матрицю 20 порядку, а також верхню діагональну матрицю, що входить в першу.

За допомогою матриць отримано відповідно 294 типів активних виконавчих органів з послідовним та 147 з одночасним двох способним руйнуванням вибою. Використання двох аналогічних способів руйнування не урахувалося. Тому до матриць не увійшли 106 комбінованих виконавчих органів з послідовним та 63 виконавчих органа з комбінованим одночасним, способом руйнування. До них увійшли активні виконавчі органи, що здійснюють відомі способи руйнування вибоїв. У відповідності з конструктивними ознаками активізаторів розрихлювачів, згідно класифікації, що пропонується, порядок квадратичної матриці відповідає числу активних виконавчих органів, що відрізняються за конструктивними ознаками. Намагання реалізувати статико–динамічний спосіб рихлення різних масивів не дали потрібних результатів. Причиною є низька питома енергоозброєність та мала їх надійність [7]. Тому все більша увага приділяється гідравлічним та гідропневматичним ударним пристроям для руйнування міцних масивів. Вони забезпечують можливість накопичення великих енергій в малих габаритах машини. Наявність у гідропневмоударниках вбудованого пневматичного акумулятора відрізняє їх від гідравлічних ударних пристроїв. Пневматичні акумулятори забезпечують плавну і в широких межах зміну енергії ударів. Це дозволило підтримувати необхідні режими роботи в конкретних гірничих умовах. Гідропневмоударні вузли розрихлювачів здатні розвивати енергію одиничного удару від 1 до 10 кДж при частоті ударів від 1 до 10 Гц.

Подальше збільшення високих енергетичних показників зв'язано із зростанням реактивних зусиль, які діють шкідливо на конструкцію машини та оператора. Для усунення цього недоліка в запропонованій конструкції активного розрихлювача (АС № 749118, Е 02 f 5/30) використано принцип проти руху ударних мас. Втілення цього принципу досягнуто встановленням двох гідропневмоударників, що працюють у проти фазі за замкненим циклом. Гідравлічну схему динамічного вузла розрихлювача показано на рис 2.



**Рисунок 2 – Гідравлічна схема динамічного вузла активного розрихлювача:**

1 – бак з робочою рідиною; 2 – гідронасос; 3 – пневмоакумулятор;

4 – нижній гідропневмоударник; 5 – верхній гідропневмоударник;

6, 7 – гідророзподільники; 8 – золотник управління

У схемі передбачено наявність зв'язаних між собою робочих вузлів із трубопроводами. Напірна магістраль верхнього основного ударника підключена до гідросистеми базової машини, а зливна магістраль зв'язана через винесений золотник управління з напірною магістраллю нижнього гідропневмоударника. Зливна магістраль цього ударника зв'язана з баком базової машини.

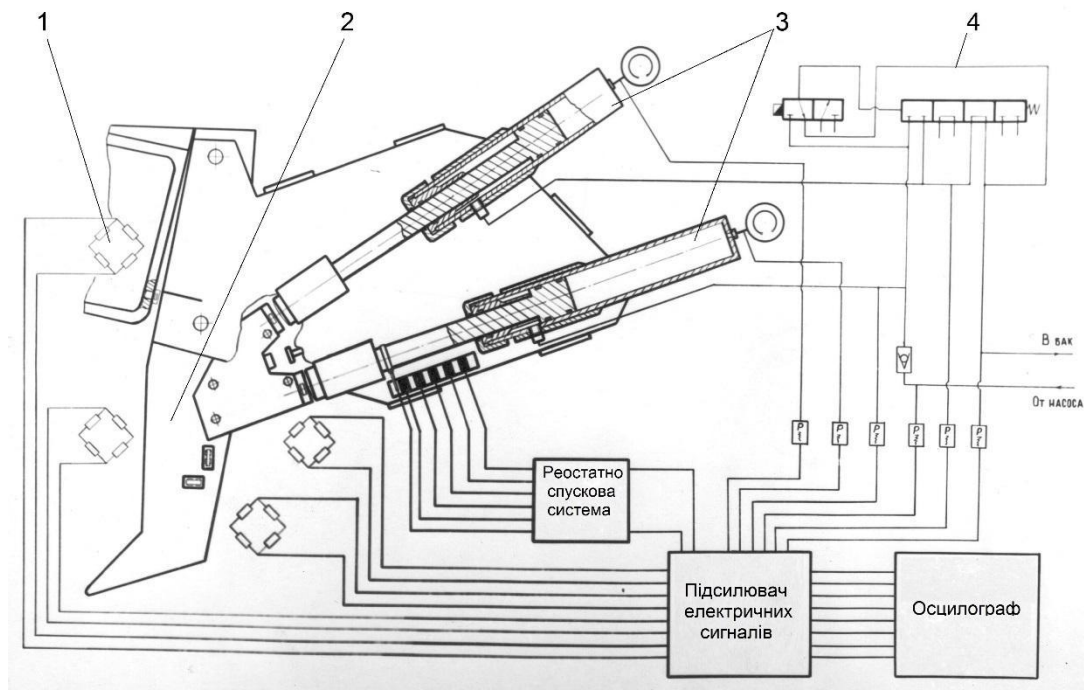
Подача робочої рідини насосом базової машини забезпечує взведення основного ударника. При цьому забезпечується стиснення газу в пневмоакумуляторі та накопичування енергії. В кінці процесу взведення спрацьовує кінцевий вимикач і видається команда на золотник управління. Після спрацьовування золотника рідина з порожнини взведення основного ударника подається у порожнину взведення другого ударника і він зводиться. При цьому основний ударник виконує робочий хід і наносить удар по ковадлі «зуба» розрихлювача. По закінченню взведення безконтактний кінцевий перемикач управління перемикає верхню порожнину зведення на злив. Допоміжний ударник виконує удар по своєму ковадлу на «зубі» розрихлювача. Надалі цикл повторюється.

В якості базової використано машину яка забезпечила тягове зусилля від 0,16 до 0,24 МН, що при швидкості подачі 1,5 м/с відповідає споживаній потужності 230 кВт. Ці показники більше ніж у три рази перевищують відомі розрихлювачі мерзлих та напівскельних масивів. Вказані показники забезпечили продуктивність до  $0,167 \text{ м}^3/\text{с}$ .

**Метою дослідження** є встановлення закономірностей зміни швидкості антифазного розрихлювача від глибини розрихлення, енергії та частоти ударів.

**Задачею дослідження** є обґрунтування робочих параметрів активного розрихлювача з антифазним виконавчим органом.

Для проведення натурних випробувань створено повно розмірний випробувальний стенд (рис. 3), який є повнорозмірним зразком активного розрихлювача.



**Рисунок 3 – Повнорозмірний випробувальний стенд активного розрихлювача:**

1 – тензометричні датчики; 2 – зуб розрихлювача; 3 – гідропневмоударники;

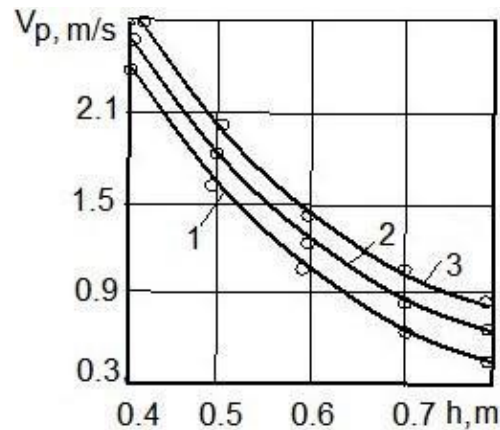
4 – гідросистема управління



## ОСНОВНА ЧАСТИНА

**Результати та обговорення.** При випробуваннях повновимірний стенд підключався до аксіально–плунжерного насосу типу 210.25.12.20. Насос забезпечував робочий тиск 15,58 МПа при продуктивності  $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . В якості робочої рідини використано масло веретенне АУ. Регулювання початкових тисків газу в пневмо акумуляторах від 0,9 до 2,1 МПа для допоміжного і від 4,0 до 4,8 МПа для основного. Це дозволяло змінювати енергію ударів відповідно від 1,0 до 2,2 кДж і від 4,0 до 8,0 кДж. При цьому швидкість ударних мас коливалась від 4,0 до 8,7 м/с, частота ударів змінювалася від 1,0 до 2,5 Гц.

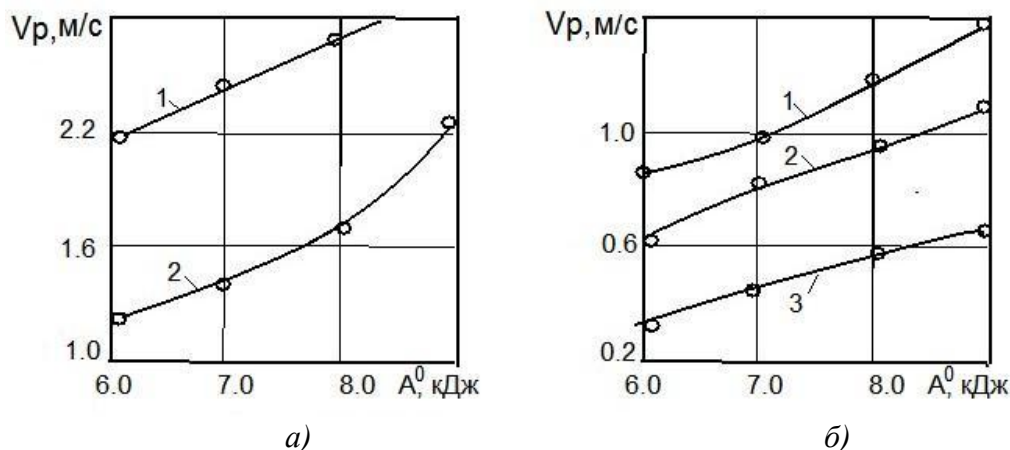
Польові випробування активного розрихлювача проводилися в зимовий період на полігоні селища Гореничі Київської області. Промерзання ґрунту досягало 1,1 м. Вплив глибини рихлення на швидкість рихлення активного розрихлювача вивчався при тяглових зусиллях базової машини 0,16 і 0,24 МН. Ці значення обрані з розрахунку, що активне рихлення ведеться при коефіцієнті зчеплення базової машини з поверхнею складали відповідно 0,4 і 0,6. На рис. 4 показано залежність швидкості активного розрихлювача від глибини рихлення мерзлого ґрунту VIII категорії за класифікацією ґрунтів НДІ «Будшляхмаш» при енергії одиничного удару від 6,0 до 8,0 кДж.



**Рисунок 4 – Залежність швидкості активного розрихлювача від глибини рихлення мерзлого ґрунту VIII:**

1, 2, 3 – при енергії одиничного удару відповідно 6,0; 7,0; 8,0 кДж

Польові випробування показали, що зміна швидкості з ростом глибини рихлення носить нелінійний характер. Зі збільшенням глибини від 0,4 до 0,5 м швидкість рихлення знижується в 1,83; 1,72 і 1,74 рази при енергії удару відповідно 6,0; 7,0 і 8,0 кДж. При зростанні глибини рихлення від 0,5 до 0,6 м інтенсивність зниження швидкості зменшується. В цьому випадку швидкість знижується відповідно в 1,52; 1,45 і 1,74 рази. Збільшення глибини рихлення від 0,6 до 0,7 м веде до зниження швидкості рихлення відповідно у 1,29; 1,23 і 1,56 рази. Зменшення інтенсивності падіння швидкості обумовлено тим, що у області критичних для даної конструкції зуба глибин підвищується ефективність використання динамічного навантаження породного масиву. Найбільший вплив на підтримання швидкості рихлення досягнуто при енергії ударів 7,0 кДж. При цьому спостерігалось найменше зниження швидкості при збільшенні глибини рихлення. На рис. 5 показані залежності швидкості активного розрихлювача  $V_p$  від енергії удару  $A^0$ : а – рихлення на глибину 0,4 (1); 0,5 (2) м; б – при глибині рихлення 0,6 (1); 0,7 (б) і 0,8 (3) м.

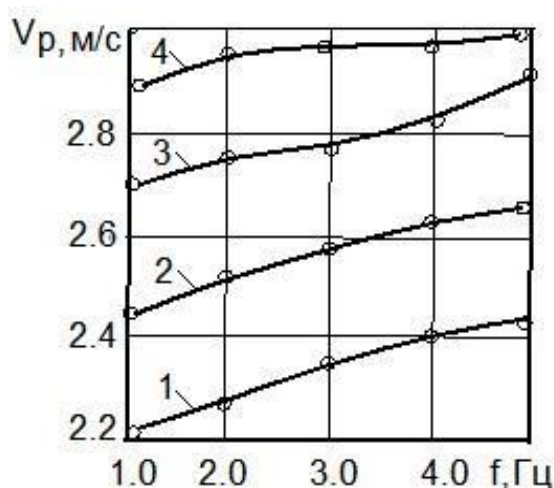


**Рисунок 5 – Залежності швидкості активного розрихлювача від енергії удару:**

- а) –  $V_p$  при рихленні на глибину 0,4 (1); 0,5 (2) м;  
 б) –  $V_p$  при глибині рихлення 0,6 (1); 0,7 (2); 0,8 (3) м

При збільшенні енергії ударів швидкість активного розрихлювача змінюється лінійно на глибинах 0,4; 0,6; 0,8 м. Лінійне зростання швидкості пояснюється тим, що рихлення на глибину 0,4 м можливо на підвищених швидкостях, і динамічні навантаження при цьому повністю витрачаються на створення напруженого стану вибою та його руйнування. При глибинах рихлення 0,7 та 0,8 м динамічні навантаження у сукупності з тягловим зусиллям витрачається на подолання сил опору рихлення. При рихленні на глибину 0,5 м і активізації зуба ударами з енергією 9,0 кДж тяглове зусилля знижується з 0,24 до 0,16 МН. Цим пояснюється зростання швидкості рихлення. При глибині 0,6 м зростання енергії більше ніж 8,0 кДж викликає нелінійну зміну швидкості. В цьому випадку частина енергії витрачається на переподрібнення продуктів руйнування і підвищення швидкості їх евакуації від вибою. Така втрата енергії не є раціональним, тому підвищення енергії удару більше ніж 8,0 кДж при рихленні на глибинах 0,6 – 0,7 м недоцільне для ґрунтів VIII категорії з числом ударів ударника ДорНДІ [8].

На рис. 6 показані залежності швидкості активного розрихлювача від частоти при розробці породного масиву  $C=100$  на глибину 0,4 м.



**Рисунок 6 – Залежність швидкості активного рихлення породного масиву  $C=100$  на глибину 0,4 м від частоти ударів: 1, 2, 3, 4 – при енергії ударів відповідно 6,0; 7,0; 8,0; 9,0 кДж і тягловому зусиллі 0,16 МН**

Тяглове зусилля базової машини було 0,16 МН. З рисунка видно, що при енергіях удару 8,0 та 9,0 кДж і зростанні частоти ударів від 1,0 до 5,0 Гц швидкість рихлення зростає майже лінійно від 2,7 до 2,9 і від 2,31 до 2,93 м/с. Причиною зростання швидкості є збільшення проміжків часу між повторними ударами і необхідністю більшої ударної потужності для створення необхідного для руйнування масиву напруженого стану останнього. При енергіях удару 6,0 та 7,0 кДж швидкість розрихлювача зростала зі збільшенням частоти від 1,0 до 3,0 Гц. Подальше зростання частоти ударів від 3,0 до 5,0 викликало зменшення інтенсивності зростання швидкості. Причиною цього є зменшення ефективності використання ударного навантаження активного розрихлювача. При частотах більших ніж 3,0 Гц частина її витрачається на підвищення швидкості видалення продуктів руйнування із вибою [7].

Польові випробування проводилися у зимовий період. Рихленню підлягали мерзлі супіски і глини. Опір руйнуванню визначався за числом ударів динамічного щільностеміра ДорНДІ. Він коливався від 57 до 70 ударів для супісків при температурі ґрунту 271 – 272 К і від 69 до 110 ударів для глин при температурі 270– 269 К. Глибина промерзання змінювалась від 0,8 до 1,0 м.

Активне рихлення проводилось при активізації зуба енергією ударів від 5,0 до 9,0 кДж при частоті 2,0...2,5 Гц. Випробуваннями передбачалося порівняння показників статичного і активного рихлення, оцінювання працездатності і ефективності рихлення статикодинамічним способом, порівняння за керованістю базовою машиною з працюючою і вимкненою динамічною приставкою.

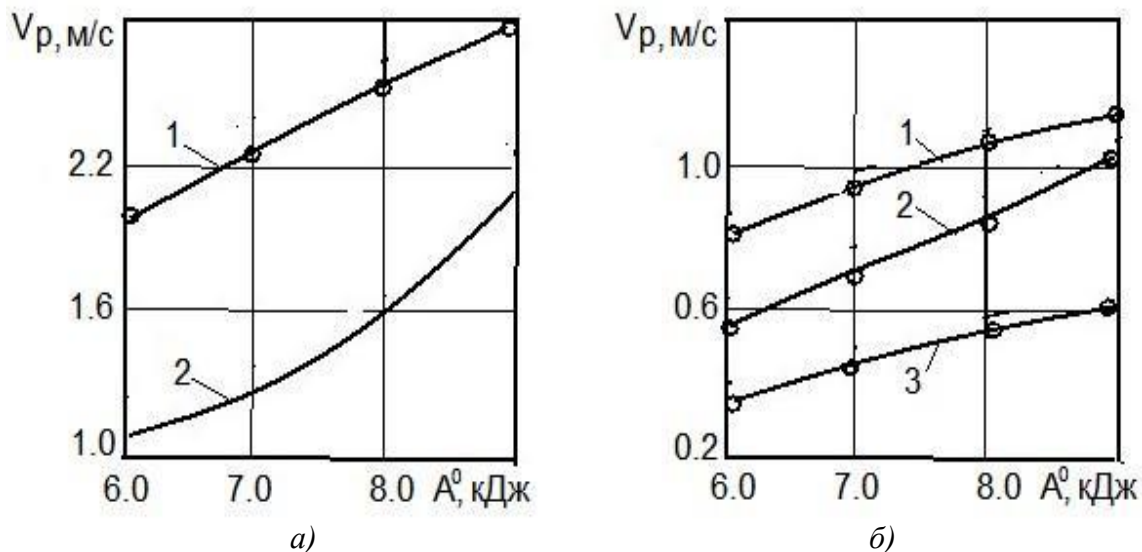
В результаті встановлено, що при активному і статичному рихленні форми перерізу борозн складаються з двох характерних частин – верхньої та нижньої. Нижні частини, як для статичного так і для статикодинамічного рихлення близькі до лобової поверхні зуба. Форма перерізу верхньої частини борозни активного рихлення подібна проекції сферичного сегменту на вертикальну вісь. Переріз верхньої частини борозни статичного рихлення нагадував рівнобічну трапецію.

Зміна форми борозни під час статикодинамічного рихлення забезпечило 3,7...3,9 разове підвищення продуктивності понад статичним рихленням. Продуктивність досягала 0,111 м<sup>3</sup>/с.

В випробуваннях використано серійний статичний розрихлювач. Відношення маси ударника до маси зуба не було оптимальним, а складало 350/190. При такому співвідношенні коефіцієнт передачі енергії удару у вибій ледь досягав 0,3. Встановлено ефективність двохразового зниження віддачі при сумісній роботі двох гідропневмоударників у протифазі. Рихлення з відключеними гідропневмоударниками супроводжувалося відхиленням руху базової машини у горизонтальній площині на  $\pm 0,1$  м у обидві сторони від заданого прямолінійного напрямку руху. При включенні гідропневмоударників рух машини у прямолінійному напрямку був стійкий, полегшилося керування базовою машиною.

Другий етап польових випробувань проводився на об'єктах «Укрпромбудексавація». Рихлення проводилося мерзлого породного масиву IV–VI категорії. Глибина промерзання складала 0,4...0,8 м. Зростання енергії удару основного ударника спостерігалось при зменшенні тиску в пневмоакумуляторі допоміжного ударника і збільшенні тиску в пневмоакумуляторі основного ударника. При випробуваннях фіксувалася швидкість руху базової машини; частота ударів гідропневмоударників при ручному і автоматичному режимах роботи; ширина розвалу і глибина рихлення в статичному і статико–динамічному режимах роботи. За період випробувань розрихлено біля 20 тисяч м<sup>3</sup> мерзлого ґрунту. Пошкоджень базової машини і динамічної приставки не відмічалось. Ширина розвалу борозни при статичному рихленні складала 0,14...0,25 м, при статико–динамічному – 0,5...1,2 м,

глибина рихлення становила відповідно 0,20...0,40 м і 0,5...0,8 м. Продуктивність активного рихлення при перерахунку на годинну перевищила продуктивність статичного рихлення в 4,5 рази і складала для умов випробування 0,175 м<sup>3</sup>/с. Встановлено залежність швидкості розрихлювача від енергії ударів, (рис 7).



**Рисунок 7 – Залежність швидкості активного розрихлювача від енергії удару:**

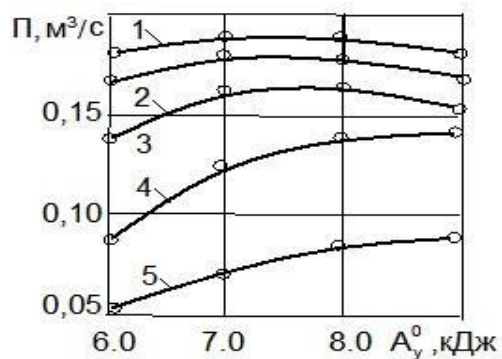
*а – при рихленні на глибину 0,4 м (1) і 0,5 м (2);  
б – при рихленні на глибину 0,6 м (1), 0,7 м (2) і 0,8 м (3)*

З отриманих залежностей видно, що при активному рихленні на глибину 0,6 і 0,7 м зростання енергії удару від 6,0 до 9,0 кДж викликало лінійне зростання швидкості розрихлювача в 1,9 рази відповідно від 0,32 до 0,61 і від 0,54 до 1,3 м/с. Лінійність зростання швидкості при рихленні на цю глибину пояснюється тим, що сукупність станичних навантажень від базової машини і динамічних від активного виконавчого органу повністю витрачалась на руйнування породного масиву. З заглибленням зуба на 0,6 м лінійна зміна швидкості в 1,5 рази від 0,72 до 1,08 м забезпечена при енергії удару від 0,6 до 8,0 кДж. Подальше зростання енергії удару до 9,0 кДж викликало нелінійну зміну швидкості базової машини в 1,1 рази від 1,08 до 1,2 м/с ударі. Зниження інтенсивності зростання швидкості при дії ударних навантажень обумовлено тим що на малих глибинах рихлення реакція вибою на переміщення зуба зрівнювалася з тягловим зусиллям базової машини. При активному рихленні на глибину 0,6 м енергія удару не повинна перевищувати 8,0 кДж. З зануренням зуба до 0,5 м лінійна дільниця зміни швидкості від 1,08 до 1,28 м/с спостерігалася при зростання енергії удару від 6,0 до 7,0 кДж. Подальше зростання енергії удару до 8,0 кДж приводить до нераціональних енергетичних витрат активного виконавчого органа розрихлювача [9].

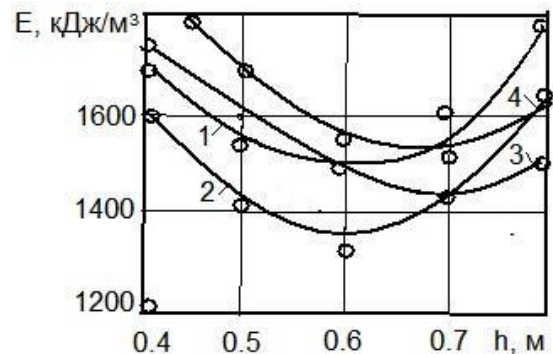
Під час промислових випробувань встановлені залежності продуктивності активного рихлення від енергії удару: 1, 2, 3, 4 і 5 – при рихленні породного масиву щільністю 100...110 ударів динамічного щільностеміра відповідно на глибину 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 і 0,8 м. Аналіз залежностей, які отримані, (рис. 8), показав, що при рихленні на глибину 0,4 м і зміні енергії удару від 6,0 до 7,0 кДж збільшує продуктивність рихлення від 0,173 до 0,201 м<sup>3</sup>/с. Це пояснюється тим, що при збільшенні енергії удару до 7,0 кДж збільшувалась площа перерізу верхньої частини борозни, за рахунок відділення від масиву більших шматків гірської маси. Зі збільшенням енергії удару від 7,0 до 8,0 кДж продуктивність знижувалася з 0,201 до 0,199 м<sup>3</sup>/с, а при енергії удару 9,0 кДж продуктивність становила 0,193 м<sup>3</sup>/с. Зниження продуктивності при зростанні енергії



удару більше 7,0 кДж пояснюється тим, що глибина рихлення 0,4 м не є критичною і надлишок енергії удару приводить до збільшення відношення між нижньою і верхньою частинами борозни рихлення.



**Рисунок 8 – Залежності продуктивності активного рихлення від енергії удару:**  
1, 2, 3, 4 і 5 – при рихленні породного масиву щільністю 100...110 ударів динамічного щільностеміра відповідно на глибину 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 і 0,8 м



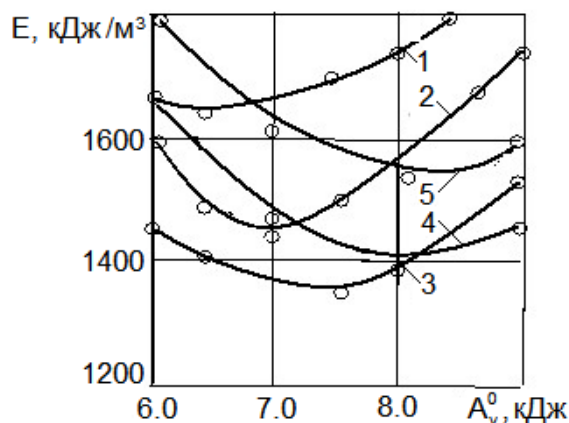
**Рисунок 9 – Залежності питомої енергоємності від глибини рихлення при різних енергіях удару по зубу:**  
1, 2, 3, 4 відповідно 6,0; 7,0; 8,0 і 9,0 кДж

При енергії удару 9,0 кДж рихлення велося на другій передачі зі швидкістю 2,1 м/с. Тяглове зусилля базової машини досягало 0,15 МН. Максимальна продуктивність активного рихлення на глибину 0,5 м досягала 0,197 м³/с. Наявність такого максимуму дозволило вибрати оптимальне співвідношення між перерізами верхньої і нижньої частинами борозни і забезпечити оптимальний режим роботи активного розрихлювача. Максимум продуктивності на критичній глибині 0,6 м становив 0,175 м³/с і досягався при швидкості базової машини на першій передачі 0,88 м/с, тягловому зусиллі 0,252 МН і активізацією зуба ударами енергією 7,0 кДж. Збільшення енергії удару до 9,0 кДж призводило до зниження продуктивності до 0,160 м³/с. Таке незначне зниження продуктивності на критичній глибині рихлення свідчить про зменшені витрати енергії, що витрачається на передроблення продуктів руйнування породного масиву та надання їм більшої швидкості розлітання. Таким чином глибина 0,6 м є глибиною, на якій збільшення енергії удару від 7,0 кДж не призводить до зростання продуктивності.

На рис. 9 показані залежності питомої енергоємності від глибини рихлення при різних енергіях удару по зубу розрихлювача, (1, 2, 3, 4 відповідно 6,0; 7,0; 8,0 і 9,0 кДж). Їх аналіз показав, що для кожного значення енергії удару є своя оптимальна глибина рихлення, при якій питомі енерговитрати мінімальні. Зростання енергії удару від 6,0 до 7,0 кДж дозволило збільшити оптимальну глибину рихлення від 0,5 до 0,6 м і знизити питому енергоємність на 13,2 % зі 1485 до 1312 кДж/м³. Подальше збільшення енергії удару до 8,0 кДж, хоча й збільшує глибину активного рихлення з мінімальною питомою енергоємністю до 7,0 м, при цьому на 5,2% вище, ніж активізація зуба енергією удару 7,0 кДж. Це свідчить, що для роботи на глибині більше 0,6 м необхідно збільшення енергії удару вище 10 кДж [10].

Залежності питомої енергоємності від енергії удару активного виконавчого органу показано на рис. 10. Зростання глибин від 0,4 до 0,5 м в зоні до критичних глибин знизило питому енергоємність з 1590 до 1440 кДж/м³ при зростанні продуктивності активного рихлення від 0,185 до 0,197 м³/с. Це пояснюється тим, що на докритичних глибинах сили опору переміщенню зуба малі і дозволяють рихлити породний масив на

робочих швидкостях відповідно 2,18 і 1,28 м/с при менших тяглових зусиллях. Рихлення в цьому випадку велося на глибину 0,4 м на другій передачі базової машини.



**Рисунок 10 – Залежність питомої енергоємності активного рихлення від енергії удару:**

1, 2, 3, 4 і 5 – при рихленні на глибину відповідно 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 і 0,8 м

Опускання зуба на за критичні глибини на 0,7 або на 0,8 м призвело до зниження швидкості рихлення за рахунок зростання сил опору. Питома енергоємність при цьому становила відповідно 1380 і 1540 кДж/м³, продуктивність – 0,135 і 0,089 м³/с. В закритичній зоні з ростом глибини питома енергоємність зростала, причиною тому було перевантаження двигуна базової машини. Для активного рихлення на закритичних глибинах, при яких мінімум питомої енергії зміщується на глибину більшу ніж 0,75 м необхідно зростання енергії удару до 10 кДж. Аналіз залежностей 2, 3 і 4, (рис. 10), показав, що питома енергоємність знижувалася з 1312 до 1282 кДж/м³ при збільшенні глибини від 0,5 до 0,6 м питома енергоємність зростала до 1484 кДж/м³ на глибині 0,8 м. Це дозволяє вважати, що при збільшенні енергії удару для зменшення питомої енергоємності активного рихлення доцільно заглиблення зуба до закритичної зони [10].

На рис.11 показані борозни рихлення: а) статичного; б) статико–динамічного. На рис. 12 показано динамічну приставку до статичного розрихлювача.

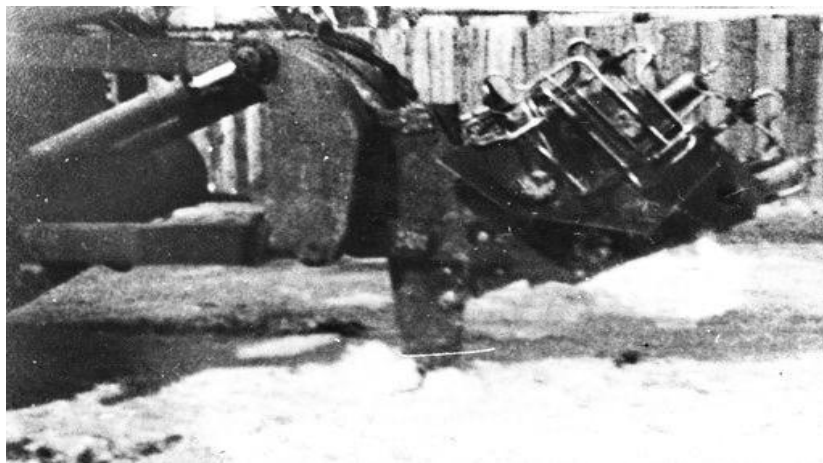


а)



б)

**Рисунок 11 – Борозни рихлення: а) – статичного; б) статико–динамічного**



**Рисунок 12 – Динамічна приставка до статичного розрихлювача**

Практичні та промислові дослідження і отримані результати підтвердили високу ефективність руйнування мерзлих ґрунтів та напівскельних гірських порід за допомогою розробленого активного розрихлювача.

### ВИСНОВКИ

1. Сукупність статичних і динамічних навантажень породного масиву дозволила збільшити критичну глибину рихлення в 1,6...2,4 рази до 0,7 м в порівнянні зі статичним рихленням. Критична глибина рихлення з активізацією зуба ударами енергією від 6,0 до 9,0 кДж знаходилися в інтервалі занурення зуба від 0,5 до 0,7 м
2. Підвищення енергії удару від 5,0 до 7,5 кДж сприяла зростанню оптимальної глибини рихлення від 0,5 до 0,6 м і зниження питомої енергоємності на 13,2 % від 1485 до 1312 кДж/м<sup>3</sup>
3. Відношення глибини рихлення до ширини ріжучої кромки зуба розрихлювача, при якому досягався мінімум питомих енерговитрат для даної конструкції зуба зросло до 4,7...6,2.
4. Оптимальним режимом активного рихлення породного масиву з числом ударів щільноміра ДорНДІ  $C=100...110$  є режим при середній швидкості руху базової машини 0,88 м/с і активізації зуба ударами енергією 7,5 кДж з частотою 2,0 Гц. Оптимальність цього режиму підтверджена мінімальною питомою енергоємністю 1282 кДж/м<sup>3</sup>, при продуктивності 0,175 м<sup>3</sup>/с.
5. Дійсний обсяг активного рихлення на другому етапі виробничих випробувань досяг 20 тисяч м<sup>3</sup> мерзлого породного масиву IV...VI категорії.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Цытович, Н.А. (2016). *Механика мерзлых грунтов*. Москва: Издательство «Академкнига». 446. ISBN:978-5-397-06492-7
2. Крючков, А.І., & Бахтін А.І. (2017). Закономірність швидкості розповсюдження сейсмічних хвиль в залежності від температури та глибини промерзання ґрунту. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. Вип. 34, 5–9.
3. Терентьев, О.М., Клецов А., Крючков А.І., & Сергієнко М.І. (2019). Технологічні параметри руйнування гірських порід при класичному і молекулярно-хвильовому підходах. ISSN 1813-5420. *НТУУ «КПІ». Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. Вип. 1, 74–82.
4. Роман, Л.Т. (2018). *Пособие по определению физико-механических свойств мерзлых и оттаивающих грунтов*. Москва: Издательство «Книжный дом «Университет», 188 с. ISBN 978-5-91304-770.0

5. Скопенков, А.Б. (2005). Вокруг критерия Куратовского планарности графов. МГУ. Журнал "Математическое просвещение". Вып.3 (Т9), 116 – 128.
6. Makarychev, Yu. (1997). A short proof of Kuratowskogo graph planarity criterion, Journal of Graph Theory, ISSN 25. 129–131. doi.org/10.1002/(SICI)1097–0118(199706)
7. Галдин, В.Н. (2011). Алгоритм и результаты расчета основных параметров рабочего органа для разрушения грунта. Новосибирск. Научные труды СибАДИ. Вып. 1(19). 55–58.
8. Крючков, А. І. & Бахтин А.І. (2018). Закономірність зміни модулю зсуву в залежності від температури та пустотності гірських порід. Науковий журнал КДУ ім. М. Остроградського: Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. Вип.1. 18–28. DOI: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Srt\\_2018\\_1\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Srt_2018_1_4)
9. Якименко, О.В. (2018) Земляні роботи. Навчальний посібник. Харків ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 157 с.
10. Лукашук, О.А., Комиссаров, А.П., & Летнев К.Ю. (2018) Машины для разработки грунтов. Екатеринбург : Изд-во Урал. Федерал. ун-та, 128 с.

### REFERENCES

1. Tsytovich, N.A. (2016). *Mechanics of frozen soils*. Moscow: Publishing «House Academic Book», 446 p. (in Russ).
2. Kriuchkov, A.I., & Bakhtyn, A.I. (2017) The Pattern of velocity expansion of the longitudinal seismic waves depending on the temperature and depth of rock, *Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi institut». Seriya «Girnitstvo»*, no. 34. 5–9
3. Terentiev, O.M., Kleshchov F.I., Kriuchkov, A.I., & Serhiienko M.I. (2019). Technological parameters of destruction of rocks at classical and waves approach. ISSN 1813–5420. NTUU «KPI». *Scientific journal «Energy: Economics, Technologies, Ecology»*. ISSUE 1. 74–82.
4. Roman, L.T. (2018). *A guide to determining the physicomechanical properties frozen and thawing soils*. Moscow: Publishing House "Book House" University ". 188 p. ISBN 978–5–91304–770.0 (in Russ.).
5. Scopenkov, A.B. (2005). Around the criterion of Kuratovskogo planarity of graphs. *Matematicheskoe prosveshchenie (Mathematical education)*, № 3 (Т9), 116—128. (in Russ.)
6. Makarychev, Yu. (1997). A short proof of Kuratowski's graph planarity criterion. *Journal of Graph Theory*, 25 (1997), 129–131.
7. Galdin V.N. (2019) Algorithm and calculation results of the main parameters of the working body for soil destruction. *Novosibirsk. SibADI*, Issue 1 (19), 55–58. (in Russ.)
8. Kriuchkov, A.I., & Bakhtyn, A.I. (2018). The regularity of the change of the shear modulus depending on the temperature and voidness of the rocks. *Naukovij zhurnal KDU im. M. Ostrogradskogo: Suchasni resursoenergozberigauchi tehnolohii girnichogo virobniictva, ISSUE 1*, 18–28. DOI: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Srt\\_2018\\_1\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Srt_2018_1_4)
9. Yakimenko, O.V. (2018). *Ground work*. Navchalnyj posibnik. Kharkiv KhNTUU im. O. M. Beketova. 157 p.
10. Lukashuk, O.A., Komisarov, A.P., & Letnev, K.Yu. (2018). *Machines for the soil development*. Ekaterinburg: Publishing of the Ural Federal University (in Russ.).

Стаття надійшла до редакції 12.11.2019.